

令和元年6月7日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06000

研究課題名(和文) ガス雰囲気中走査型マイクロ放電付加加工による硬質膜テクスチャコーテッド工具の開発

研究課題名(英文) Development of hard film texture coated tool by scanning micro discharge additional processing in gas atmosphere

研究代表者

山本 武幸 (Takeyuki, Yamamoto)

茨城大学・理工学研究科(工学野)・技術職員

研究者番号：40396594

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、各種切削工具や金型の表面に各種テクスチャパターンを有する硬質皮膜を直接的に作製する技術を、対応する各種ガス雰囲気中でのマイクロ放電堆積加工により開発した。いくつかの異なる種類の電極材料のマイクロ放電堆積による硬質膜形成の基礎実験を通して、膜生成に適した条件を検索した。その知見を利用して、窒素雰囲気中でチタンの細電極を使用して実際に切削工具の逃げ面にテクスチャ状の硬質皮膜を製造した。製造されたテクスチャ状硬質膜を有する工具を用いた純アルミニウムの切削実験の結果、工具の逃げ面における摩擦・摩耗特性のいくつかの改善が観測できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

各種ガス雰囲気中において金属細電極を溶融・反応させて微細な硬質皮膜パターンを創成するという方式は、独創性に富んでいる。この方法によって、直接的に各種工具上へ硬質皮膜によるテクスチャを施し、摩擦・摩耗特性の改善に活かす試みも、独創性に富んでいる。よって、工学的意義は高いといえる。また、上述の方式により、中小企業などであっても、放電加工の設備と素材さえ整えば、工具メーカーなどに頼ることなく、工具の長寿命化を実現しサステナブルに利用できるため、ブレイクスルーの可能性を秘めている。よって、社会的意義も高いといえる。

研究成果の概要(英文)：In this study, a technology to directly create hard coatings with various textured patterns on the surfaces of various cutting tools or mold tools was developed by micro-discharge deposition processing in correspondent various gas atmospheres. Through basic experiments of hard film formation by micro-discharge deposition for a few different types of electrode materials, conditions suitable for film generation were searched. Taking advantage of that knowledge, a texture-like film was actually created on the flank of the cutting tool using a titanium thin electrode in a nitrogen atmosphere. As a result of cutting experiments of pure aluminum with the manufactured tool with a textured hard film, some improvement of the friction and wear characteristics on the flank of the tool was observed.

研究分野：機械工作・生産工学

キーワード：機械工作・生産工学 材料加工・処理 放電加工 付加加工 硬質皮膜 切削 トライボロジ

## 1. 研究開始当初の背景

近年の切削や金型工具の発展に貢献しているのが、硬質皮膜である。高速度鋼、超硬合金やセラミック工具の表面に対し、TiNやTiC、 $Al_2O_3$ などを厚さ10 $\mu m$ 以下で皮膜することにより、工具寿命を格段に向上させられるようになっている。硬質皮膜には、物理や化学蒸着が用いられている。

一方、放電による除去加工は、塑性加工用や射出成形用の精密金型をはじめとする高付加価値な精密部品の製造に広く利用されている。ところが近年、上述の放電除去と異なり、大気中の放電付加工により、微小構造物の製造（早川伸哉, ORI Ricardo Itiro, 糸魚川文広, 中村隆, 株原十三生: 微細放電付着加工による3次元形状創成法, 精密工学会誌, (2000) 1943.) や、液中においてTi電極の放電を用いTiC表面処理を実施した例もある（後藤昭弘, 真柄卓司, 三宅英孝, 今井祥人, 齋藤長男, 毛利尚武: 放電加工による硬質被膜の形成, 電気加工学会誌, Vol. 31, No. 68, (1998) 26-31). また、放電によってドリル刃先にTiC硬質微粒子のコーティングを施し、工具寿命の向上を実証した例もあるが（毛呂俊夫, 後藤昭弘, 毛利尚武, 齋藤長男, 松川公映, 三宅英孝: 放電加工による表面改質ドリルの実用化研究, 精密工学会誌, 68, 2 (2006) 1002.), 普及には至っていない。

さらに、各種表面にテクスチャと呼ばれる微小な凹凸を設けることにより、表面機能を向上させる試みがなされており、それには摩擦・摩耗特性改善の試みも含まれる。切削工具についても、超硬工具に対しマイクロとナノテクスチャを組み合わせた工具が研究され（榎本・杉原: ナノマイクロ構造を表面に有する切削工具の開発(切りくず耐溶着性の向上, 日本機械学会論文集(C編), 74, 745 (2007). 2315), 切りくず排出における潤滑性の改善が報告されている。

## 2. 研究の目的

本研究では、ガス（窒素、酸素）雰囲気中において、直径数十～数百 $\mu m$ のチタン(Ti)やアルミニウム(Al)といった金属電極を所望の軌跡で走査しつつマイクロ放電付加工し、窒化チタンや酸化アルミニウムなどの硬質材料を所望の表面テクスチャ構造で切削工具や金型工具などの表面に直接的に皮膜するという合理的かつ斬新な手法により、高密着性の硬質膜テクスチャコーテッド工具を製造する技術の開発を目的とする。

各種金属および雰囲気と放電加工条件が皮膜の形成や特性などに及ぼす影響を明らかにした後、実際に硬質膜テクスチャコーテッド工具を製造する。そして、製造した数種類の硬質膜テクスチャコーテッド工具によって金属工作物を実切削し、切削性能を評価することにより、開発工具の有用性を明らかにする。

## 3. 研究の方法

### (1) マイクロ放電堆積加工実験（条件探索）

本研究では、RC放電回路を搭載した放電加工装置(Sodick AE-05)を用いて堆積加工を試みた。図1に加工実験装置の概要を示す。放電加工では加工液（媒体）中での加工が一般的であるが、堆積加工の液中における実現は困難であること、また、Tiの窒化によるTiN硬質皮膜の創成やAlの酸化による $Al_2O_3$ 硬質皮膜の創成を目指していることから、加工部周辺をビニールで覆い、そこにガスチューブを経由してガスを充填させる方式を採用した。ガスの濃度による加工雰囲気差が生じないように、実験はガスの注入を始めた後、10分経過後に実施した。図2に放電堆積加工時の電極の送り動作の概要を示す。Z軸(高さ)下方向に送りを与えながらX軸(水平)左右方向へサーボ制御も併用しつつ複数回往復操作することにより堆積加工を実施した。加工後の堆積物観察にはレーザ顕微鏡OLS4000-SMT(Olympus)を用いた。

ここでは、マイクロ放電堆積に適切な加工条件を探索するため、コンデンサ容量、電極の直径、z軸(深さ方向)送り量が熔融した電極材料の基材上への堆積に及ぼす影響を調査した。なお、放電堆積効率の向上をねらい、微粉末を高静水圧下で固めた細電極による放電堆積実験も試みた。なお、いずれの場合も、放電堆積加工を実施する装置上において、Ag-Wブロックを相手に絶縁油中において機上放電加工することにより、細電極の成形を実施した。

### (2) 切削工具への放電皮膜テクスチャの創成

次いで、(1)から得た知見を基に、実際に切削工具表面上への簡単なパターンによるテクスチャ型の堆積皮膜創成を試みた。切削工具上へ創成したテクスチャパターンの模式図を図3に示す。

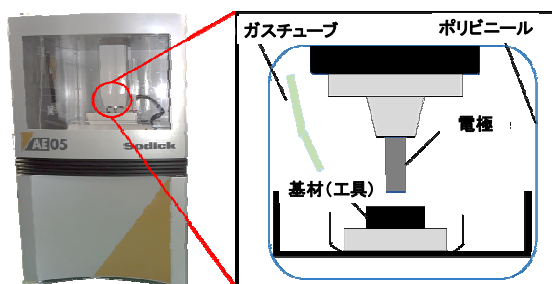


図1 マイクロ放電堆積加工実験装置の概略

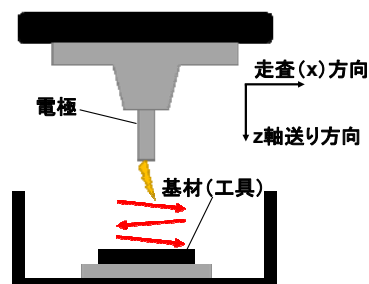


図2 線状放電堆積時の電極の走査と送り

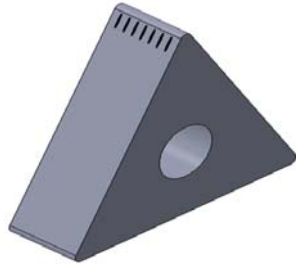


図3 工具への簡単なテクスチャパターン

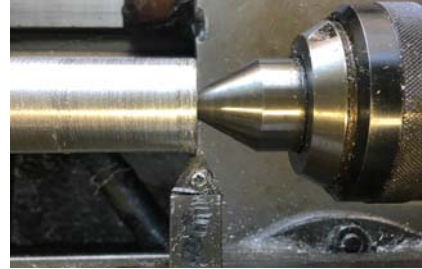


図4 テクスチャ型皮膜工具による切削の様子

工具チップの逃げ面に対し直線状のテクスチャを施した。他の研究者らによる先行研究(杉原達哉, 榎本俊之:微細表面構造を有する高機能切削工具の開発に関する研究:鉄鋼材料の切削, 精密工学会春季大会講演論文集, (2009) 125-126.)を参考に, テクスチャパターンの間隔を決めた。

### (3) 放電皮膜テクスチャ工具による切削実験

切削用チップの逃げ面に対してテクスチャを施した工具を用いて切削実験を行った。切削には旋盤を使用し, 図4に示すように被加工物を回転させながら工具を加工物の長手方向へ一定速度で送り切削を行った。治具の先端に堆積加工を施した切削用チップを取り付け固定し切削実験を行った。切削性能の評価として摩耗の損傷具合を調査するために放電堆積加工の堆積物の観察に用いたレーザ顕微鏡を使用した。

## 4. 研究成果

### (1) マイクロ放電堆積加工実験 (条件探索)

窒素雰囲気中でTi電極を用いた場合におけるマイクロ放電堆積加工実験の代表的な条件を表1に示す。比較的早期における放電堆積実験による検討の結果, 利用した装置上でコンデンサ容量を最大とし, z軸送り量を900 $\mu\text{m}$ 程度以上(走査距離3000 $\mu\text{m}$ の場合)すなわちz軸送り量/走査距離を30%程度以上とするのが堆積効率や安定性の観点から適当であることが判明した。放電堆積による直線状皮膜形成の成功例として, 図5に直径100 $\mu\text{m}$ のTi電極を用いた場合のレーザ顕微鏡による観察結果を示す。

図5の結果から, 直線状の堆積物が観察され, 皮膜形成に成功していることがわかる。4種類の異なる直径のTi電極を用いて放電堆積による直線状皮膜形成実験をした場合における, 長手方向に対する断面高さを測定した比較結果を図6に示す。ここで, 基材表面を基準高さの0としている。0より高ければ堆積が, 0より小さければ除去が行われているとみなせる。図6の結果から, 直径の最も小さい100 $\mu\text{m}$ だけが平均高さ40 $\mu\text{m}$ の堆積物の創成に成功し, 反面にそれより太い電極では数 $\mu\text{m}$ 程度の深さの除去と堆積が混在したような形態をとっていることがわかる。

表1 代表的な放電堆積加工実験条件

放電電圧 [V]	76
コンデンサ容量 [ $\mu\text{F}$ ]	0.1
基材 (切削工具)	サーメット
電極材料	純チタン(Ti)
電極の直径 $\phi$ [ $\mu\text{m}$ ]	100, 150, 200, 300
z軸送り量 [ $\mu\text{m}$ ]	900
走査距離 [ $\mu\text{m}$ ]	3000
電極側の極性	陽極
放電媒体 (雰囲気)	窒素 ( $\text{N}_2$ )

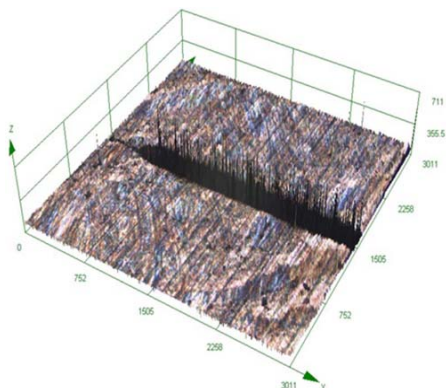


図5 線状の堆積物 (Ti電極, 直径100 $\mu\text{m}$ )

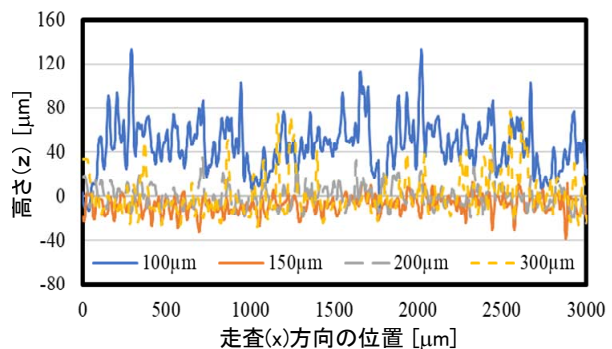


図6 電極径の堆積断面高さへの影響 (Ti電極)



これは、電極が太くなると電極先端と基材表面との界面において双方の熔融を十分に与えるような放電エネルギー密度を得られないことが最大要因と考えられる。

以上の結果から、100 μm 程度もしくは未満の直径の Ti 電極を用いることにより、切削工具上への皮膜が可能なことがわかった。

一方で、純 Al 電極を利用する場合は堆積皮膜の酸化をねらい、大気中で放電堆積を試みた。その際の放電加工条件は表 1 とほぼ同様である。しかし、期待した十分な厚みと密着性の堆積皮膜は形成できなかった。さらに、高堆積効率をねらい、純 Ti および純 Al 微粉末を高静水圧下で固めた細電極による放電堆積も試みたが、不十分な厚みと密着性堆積皮膜の形成はできなかった。よって、以降では純 Ti の細電極に焦点を絞って検討することに方針を改めた。

### (2) 切削工具への放電皮膜テクスチャの創成

(1) の成果を参考に、直径 100 μm の Ti 電極を用い、表 1 に示した放電条件下で z 軸送り量を 300 μm、走査距離を 1000 μm、間隔を 600 μm として 7 本の直線状パターンをサーメット切削工具の逃げ面に対し放電堆積加工し、比較的単純なテクスチャの創成を試みた。図 7 と 8 はレーザー顕微鏡観察で得られたテクスチャの鳥観図と断面図である。図 8 中の破線は、各線状パターンの存在か所の指示用に記した。これらの結果から、高さの安定性に課題は残るものの、7 本の直線状の皮膜パターンの創成に成功していることがわかる。

### (3) 放電皮膜テクスチャ工具による切削実験

上記(2)において製作した放電皮膜テクスチャ工具の性能を評価するため、表 2 に示す切削条件により切削実験をし、汎用のテクスチャなし工具と比較した。図 9 に切削後におけるレーザー顕微鏡による逃げ面の観察結果の比較を、図 10 に逃げ面の断面図をそれぞれ示す。図 10 の破線は、各線状パターンの存在か所を指示するために記した。

図 9 と 10 より、切削後もテクスチャは十分に残存していることが確認でき、ある程度硬質の

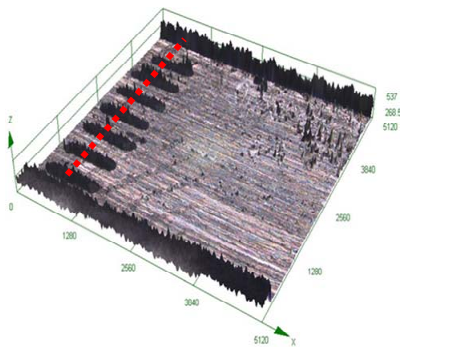


図 7 工具逃げ面上のテクスチャの鳥観図

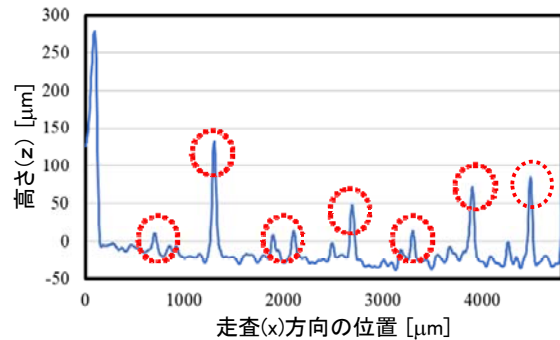
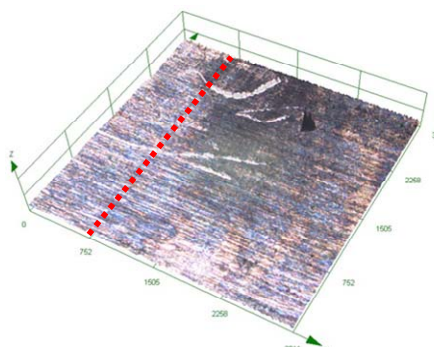


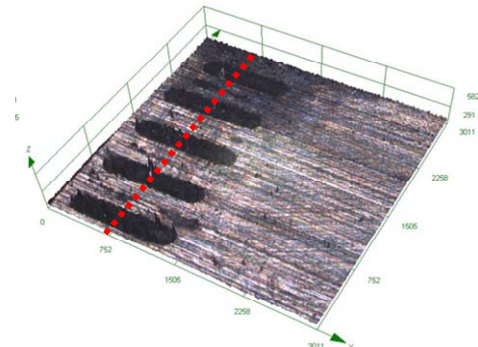
図 8 工具逃げ面上のテクスチャの断面図

表 2 製造した工具による切削実験条件

工作物	純アルミニウム (Al)
切削工具	サーメット (テクスチャなし(a), あり(b))
切削速度 [m/s]	2.59
切込み深さ [mm]	0.5
送り [mm/rev]	0.2
切削距離 [m]	78



(a) テクスチャなし



(b) テクスチャあり

図 9 切削後の工具逃げ面の鳥観図比較

TiN が創成された。また、鳥瞰図からテクスチャありの場合の方が工具逃げ面の摩耗痕は目立たないように見える。さらに、図 10 から、刃先に近い位置におけるパターンへの摩耗が大きくなる傾向もみられる。よって、テクスチャパターンの太さや間隔、被覆率を見直すなどの改善が必要なことも明らかになった。

#### (4) まとめ

工具表面へのテクスチャ型の硬質皮膜創成を目指し、ガス中でサーメット切削工具に放電堆積加工実験を行った。さらに、テクスチャを施した工具による切削性能評価も実施した。得られた結論を以下にまとめる。

- ・電極径 100  $\mu\text{m}$  以下の Ti 電極では、電極の溶融が安定的に持続し、良好な堆積が実現できる。
- ・z 軸送り量が走査送り量の 30%以上では、電極溶融が安定し、良好に堆積皮膜形成できる。
- ・放電皮膜テクスチャ工具による Al の切削実験から、切削後もテクスチャが十分残存し TiN 化がみられたことと、ある程度の工具摩耗の低減効果を有することがわかった。

しかしながら、厚み分布を含めた皮膜の形状や寸法の安定性や、硬度分布の評価、摩擦特性向上に効果的なテクスチャパターンの探索など、実用に向けて多くの課題を残している。そのため、引き続き検討を実施して、本研究成果を確固たるものにし、本提案技術の普及に努力する。

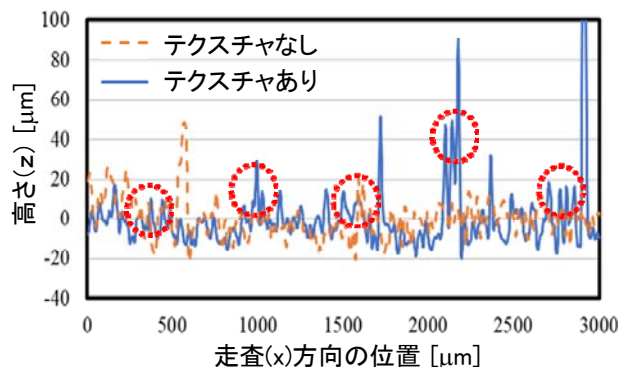


図 10 切削後の工具逃げ面の断面図比較

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① [Jun Shimizu](#), Tomotaka Nakayama, Kouta Watanabe, [Takeyuki Yamamoto](#), [Teppei Onuki](#), [Hiroataka Ojima](#), [Libo Zhou](#), Friction Characteristics of Mechanically Microtextured Metal Surface in Dry Sliding, Tribology International, 査読有, in press, 2019 <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.02.04>
- ② [Jun Shimizu](#), [Takeyuki Yamamoto](#), [Libo Zhou](#), [Teppei Onuki](#), [Hiroataka Ojima](#), Development of Microtextured Titanium Dioxide Surface by using Microcutting Techniques, Ceramics Transactions, 査読有, Vol. 257, 2016, pp. 35-42 <https://doi.org/10.1002/9781119234463.ch4>
- ③ [清水 淳](#), [周 立波](#), [小貫哲平](#), [尾畷裕隆](#), 三輪紘敬, 南部俊和, ナノ接触実験結果と酸化膜の影響を考慮したすべり摩擦の分子動力学シミュレーション, トライボロジスト, 査読有, Vol. 61, No. 12, 2016, pp. 845-856 <https://doi.org/10.18914/tribologist.16-00011>

[学会発表] (計 18 件)

- ① 小井沼陽希, 石井雅人, 川尻淳裕, [山本武幸](#), [清水 淳](#), [周 立波](#), [小貫哲平](#), [尾畷裕隆](#), 放電付加工による表面テクスチャの創成 (第 1 報) - 直線走査による単純テクスチャの創成 -, 精密工学会春季大会学術講演会, 2019
- ② [清水 淳](#), [山本武幸](#), [周 立波](#), [小貫哲平](#), [尾畷裕隆](#), 小松崎一気, 局所圧縮静水圧援用切削の開発-すべりおよび転がり式治具による切削性能への効果-, 精密工学会春季大会学術講演会, 2019
- ③ Tomotaka Nakayama, [Jun Shimizu](#), [Libo Zhou](#), [Teppei Onuki](#), [Hiroataka Ojima](#), [Takeyuki Yamamoto](#), Kouta Watanabe, Running-in Behavior of Mechanically Microtextured Metal Surfaces in Dry Sliding, The 17th International Conference on Precision Engineering (ICPE2018), 2018
- ④ [Jun Shimizu](#), Hiroto Ashino, [Takeyuki Yamamoto](#), [Hiroataka Ojima](#), [Teppei Onuki](#), [Libo Zhou](#), Kazuki Komatsuzak, Development of Localized Compressive Hydrostatic Pressure-assisted Cutting using Rolling Element, The 17th International Conference on Precision Engineering (ICPE2018), 2018
- ⑤ [清水 淳](#), 中山智隆, 渡辺康太, [山本武幸](#), [周 立波](#), [小貫哲平](#), [尾畷裕隆](#), 微小振動援用切削テクスチャ表面のなじみ特性に関する検討 (第 2 報) - 被覆率による影響 -, 日本トライボロジー学会トライボロジー会議 秋, 2018
- ⑥ [Jun Shimizu](#), Hiroto Ashino, [Takeyuki Yamamoto](#), [Hiroataka Ojima](#), [Teppei Onuki](#), [Libo Zhou](#), Development of Localized Compressive Hydrostatic Pressure-assisted Cutting using Sliding Element, The 21st International Symposium on Advances in Abrasive Technology

(ISAAT2018), 2018

- ⑦ 山本武幸, 石井雅人, 小井沼陽希, 清水 淳, 周 立波, 小貫哲平, 尾畷裕隆, Cu-W 細電極による微小放電堆積過程の検討, 精密工学会秋季大会学術講演会, 2018
- ⑧ 清水 淳, 中山智隆, 渡辺康太, 山本武幸, 周 立波, 小貫哲平, 尾畷裕隆, 微小振動援用切削テクスチャ表面のなじみ特性に関する検討, 日本トライボロジー学会トライボロジー会議 春, 2018
- ⑨ 中山智隆, 渡辺康太, 山本武幸, 清水 淳, 周 立波, 小貫哲平, 尾畷裕隆, マイクロ切削による表面テクスチャがすべり時のなじみ過程に及ぼす影響—慣用および振動援用切削の比較—, 精密工学会春季大会学術講演会, 2018
- ⑩ 清水 淳, 芦野洗人, 山本武幸, 周 立波, 小貫哲平, 尾畷裕隆, 局所圧縮静水圧援用切削の開発—すべりおよび転がり式治具による検討—, 精密工学会春季大会学術講演会, 2018
- ⑪ Jun Shimizu, Takeyuki Yamamoto, Hiroataka Ojima, Teppei Onuki, Libo Zhou, Hiroto Ashino, Development of Localized Compressive Hydrostatic Pressure-assisted Cutting Method, The 20th International Symposium on Advances in Abrasive Technology (ISAAT2017), 2017
- ⑫ Masato Ishii, Itaru Takahama, Takeyuki Yamamoto, Jun Shimizu, Libo Zhou, Teppei Onuki, Hiroataka Ojima, Examination of Micro EDM Deposition Mechanism using Thin Cu-W Electrode, The 9th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21), 2017
- ⑬ 山本武幸, 石井雅人, 高濱 到, 清水 淳, 周 立波, 小貫哲平, 尾畷裕隆, Cu-W 細電極による微小放電堆積加工メカニズム, 精密工学会秋季大会学術講演会, 2017
- ⑭ Itaru Takahama, Takeyuki Yamamoto, Jun Shimizu, Libo Zhou, Teppei Onuki, Hiroataka Ojima, Study on micro EDM deposition in Ar atmosphere, 16th International Conference on Precision Engineering (ICPE2016), 2016
- ⑮ 高濱 到, 石井雅人, 山本武幸, 清水 淳, 周 立波, 小貫哲平, 尾畷裕隆, Cu-W 電極を用いた微小放電堆積加工, 精密工学会秋季大会学術講演会, 2016
- ⑯ Jun Shimizu, Fabrication and characterisation of nanoscale structures on Si wafer using nanoscratching and molecular dynamics simulation, MARSS2016, 2016
- ⑰ Jun Shimizu, Kouta Watanabe, Takeyuki Yamamoto, Hiroataka Ojima, Teppei Onuki, Libo Zhou, Texturing of metal surface by using vibration-assisted microcutting, euspen's 16th International Conference & Exhibition, 2016
- ⑱ 高濱 到, 山本武幸, 清水 淳, 周 立波, 小貫哲平, 尾畷裕隆, アルゴンガス中におけるマイクロ放電堆積に関する研究, 第17回高エネ研メカ・ワークショップ, 2016

[その他]

ホームページ「ナノ・マイクロファブリケーションと表面機能」

<https://sites.google.com/site/nlabibarakiuniv/research/field4>

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

周 立波 (ZHOU, Libo)

茨城大学・理工学研究科 (工学野)・教授

研究者番号: 90235705

清水 淳 (SHIMIZU, Jun)

茨城大学・理工学研究科 (工学野)・教授

研究者番号: 40292479

小貫 哲平 (ONUKEI, Teppei)

茨城大学・理工学研究科 (工学野)・准教授

研究者番号: 70400447

尾畷 裕隆 (OJIMA, Hiroataka)

茨城大学・理工学研究科 (工学野)・准教授

研究者番号: 90375361

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。